

## 研究論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2013.17.3.001>

## 로터 블레이드 스위프를 적용한 부분흡입형 축류 초음속 터빈의 성능특성에 대한 수치적 연구

정수인\* · 김귀순\*\*†

### A Numerical Study on the Performance Characteristics of a Partial Admission Axial Supersonic Turbine with Swept Rotor Blades

Soojin Jeong\* · Kuisoon Kim\*\*†

## ABSTRACT

In this study, we performed three-dimensional CFD analysis to investigate the effect of the rotor blade sweep of a partial admission supersonic turbine on the stage performance and the flow field. The computations are conducted for three different sweep cases, No sweep(NSW), Backward sweep(BSW), and Forward sweep(FSW), using flow analysis program, FLUENT 6.3 Parallel. The results of the BSW model show reduced mass flow rates of tip leakage and increased total-to-static efficiency. The strength of leading edge bow shock was decreased a little with BSW model. And the BSW model also shows a good performance around the hub region compared to other models.

## 초 록

본 연구에서는 액체로켓엔진의 터보펌프용 초음속 터빈 로터 블레이드에 스위프 각도  $\pm 15^\circ$ 를 적용하여 전방스weep(FSW), 후방스weep(BSW)모델의 유동형태 및 성능을 기준모델(NSW)과 비교하여 스위프 적용의 효과를 살펴보았다. 3차원 Navier-Stokes 유동해석에는 상용 코드인 FLUENT 6.3 Parallel을 사용하였다. BSW 모델은 기준 모델(NSW)에 비해 팁 간극으로 빠져나가는 누설 손실량을 줄이는데 효과가 있었고 정효율 증가에도 영향을 미쳤다. BSW 모델은 앞전 충격파의 강도를 다소 완화 시키고 허브 부근의 영역에서 다른 모델에 비해 좋은 성능을 보인다.

Key Words: Supersonic Turbine(초음속터빈), Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Turbopump(터보펌프), Blade Sweep(날개스weep), Turbine Performance(터빈성능)

접수일 2013. 1. 21, 수정완료일 2013. 3. 28, 게재확정일 2013. 4. 2

\* 정회원, 부산대학교 대학원 항공우주공학과

\*\* 중신회원, 부산대학교 항공우주공학과

† 교신저자, E-mail: kuskim@pusan.ac.kr

## 1. 서 론

매우 복잡한 3차원 내부 유동 특성을 가지는

터빈이나 압축기 등의 터보기계는 지금까지 성능향상을 위해 효율을 높이려는 꾸준한 노력이 진행되어 왔다. 터보기계의 성능향상을 위한 방법은 다양하지만, 그 중에서도 현재 사용되고 있는 많은 산업/항공기용 가스터빈과 압축기에 적용되고 있는 반경방향의 중첩선을 3차원적으로 변화를 주는 3차원 익형 설계 방법이 널리 쓰이고 있다. 3차원 익형 설계는 반경방향의 중첩선에 린(Lean), 스윙(Sweep), 스큐(Skew)를 주는 방식으로 주로 적용한다.

이전의 여러 연구자들이 아음속이나 천음속 영역의 압축기 로터에 3차원 익형설계를 도입하여 그 효과를 연구하였는데, 특히 Hah[1] 등은 압축기 로터에 전방 스윙을 적용하면 날개 끝단의 엔트로피 생성과 이차유동의 발생을 억제하고 후방 스윙은 충격손실을 줄이는데 효과가 있다고 보고하고 있고, Vad[2] 등은 저속의 축류형 유체기계에서 스윙이 성능 및 효율에 미치는 영향을 실험과 수치해석적 방법으로 상세히 분석하여 후방 스윙을 적용하면 효율 면에서 우수함을 보였다.

Denton 등은 논문에서 천음속 팬 성능에 미치는 린(Lean)과 스윙(Sweep)의 영향을 전산유체를 통해 연구하여 스캔의 50%~80%에 이르는 영역에서 블레이드 3차원 형상이 충격과의 위치나 충격과의 스윙 현상에 어느 정도 영향을 미치는 것을 확인하였다[3]. Pullan 등은 축류유동 터빈의 공력성능에 미치는 스윙의 효과를 알아보기 위해 45도의 스윙 각도를 가진 저압터빈 블레이드에 대한 저속 선형 캐스케이드 실험과 수치계산을 통해 연구하였다. 그 결과 중간단면에서는 스윙된 블레이드에서 형상손실(Profile loss)이 20% 가량 더 크게 측정되었고 대신 양 끝단 부근에서는 2차 유동에 의한 손실이 많이 감소함을 보였다[4, 5].

이 외에도 최근의 여러 논문에서 최적화 기법을 이용해 축류 압축기나 팬의 3차원 형상을 설계하고 성능 개선을 보고하였다[6, 7].

그러나 본 논문에서 다루고 있는 초음속 충동형 터빈에 대해서는 3차원 형상의 효과에 대해 다른 연구가 아직은 미미한 실정이다.

그 중에서, 권태운 등의 연구에서는 부분 흡입형 초음속 터빈의 로터 블레이드에 후방 스윙(Backward sweep)과 네거티브 린(Negative lean)의 3차원 형상을 각각 적용하여 전산 유동 해석을 수행하고 그 결과를 정리하였다[8]. 특히 1단 초음속 터빈의 로터에 후방 스윙 각도를 5°, 10°, 15° 적용하였을 때 익단 부근 저속영역을 감소시키고 유로내부의 전반적인 마하수 분포를 높이는 효과를 나타내어 결과적으로는 1단 터빈의 전효율이 0.5%~1.8% 까지 개선됨을 확인한 바가 있다.

본 논문에서는 이러한 이전의 연구 결과를 토대로, 초음속 축류 터빈의 성능향상 면에서 가장 효과를 보였던 15°의 스윙 형상을 초음속 1단 터빈의 로터 블레이드에 적용하고(후방 스윙) 아울러 전방으로 15° 스윙된 형상에 대해서도 적용한 후(전방 스윙), 로터 블레이드에 적용된 전방 스윙과 후방 스윙이 각각 초음속 터빈의 유동현상과 성능특성에 어떤 영향을 미치는 지 보다 구체적으로 분석하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 터빈의 기본 제원 및 계산 모델

본 절에서는 익단 간극 및 노즐-로터 축 간극을 모두 가지는 부분 흡입형 초음속 터빈 모델에 대해서 초음속 영역인 1단 터빈의 로터 블레이드에 스윙 각을 적용하여 계산을 수행하였다.

계산에 사용된 터빈은 1단 부분 흡입형 초음속 축류터빈으로서 21개의 수축-확산형의 직사각 단면 노즐과 100개의 충동형 로터로 구성되어 있다. 노즐은 출구에서의 마하수가 2.33이 되도록 설계되었으며, 로터에는 슈라우드가 설치되어 있

Table 1. Nozzle & Blade configuration data

노즐		블레이드	
목폭	4.13 mm	입구각	23.5°
노즐높이	20.9 mm	출구각	23.5°
출구폭	14.26 mm	동익스팬	32.8 mm
장착각도	19.5°	동익코드	15.8 mm

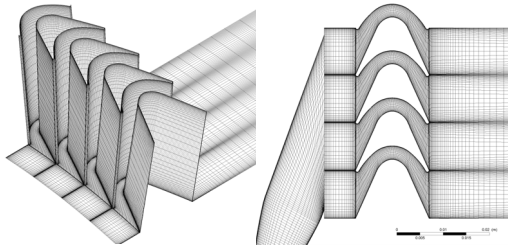


Fig. 1 Surface grid and grid at mid-span

다. Table 1에 계산에 사용된 모델 터빈의 노즐과 로터 블레이드에 대한 간단한 형상 데이터가 나와 있다.

본 논문에서 후류영역은 전산 테스트를 거친 후 축 방향으로 로터 블레이드 코드 길이의 5배 만큼으로 설정하였다. 계산 영역은 계산비용과 효율을 고려해 주기성이 확보되는 최소한의 계산영역을 적용하여 Fig. 1과 같이 1개의 노즐에 로터 4개로 구성된 유동영역을 설정하고 경계면에 회전주기조건을 주는 방식으로 1/25 환형 (Annulus) 모델에 대하여만 계산하게 된다.

격자수는 민감도 시험을 거쳐 약 185만개 정도가 사용되었고 Fig. 1에 로터 부분의 표면 격자와 블레이드 중간 단면(Midspan)에서의 계산 영역 형상 및 내부격자모양이 나와 있다.

## 2.2 스윙 블레이드 형상

로터 블레이드에 적용된 스윙 각의 정의는 문헌마다 조금씩 다르게 쓰이고 있는데 일반적으로 많이 쓰이는 방법은 Fig. 2와 Fig. 3에 나와 있듯이 로터가 터빈 회전축(x) 방향으로 기울어지는 각도로써 정의하는 것이다[3]. 즉, 익렬의 앞전이 로터 입구 유동과 수직을 이루지 않고 축 방향으로 기울어지게 된다. Fig. 2의 그림은 후방스윙(Backward sweep)이 적용된 로터 블레이드의 경우를 알기 쉽도록 원주방향 안쪽으로 본 모습을 그린 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 블레이드 각 높이에서의 단면 형상은 전혀 달라지지 않고 상대적인 x축 위치만 달라지는 것이다. 노즐-로터간의 축 간극( $g_{ax}$ )은 Fig. 3에 보이는 바와 같이 블레이드 중간 단면에서의 노즐-로터 사이의 간극 거리를 기준으로 정의하였다.

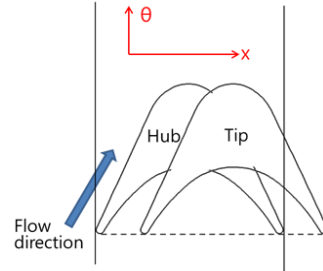


Fig. 2 Definition of sweep (view looking radially inwards on the blade)

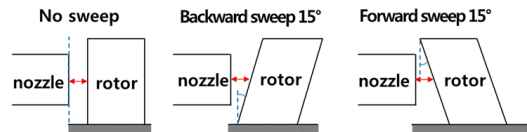


Fig. 3 Definition of sweep Angle and axial gap ( $g_{ax}$ )

## 2.3 수치기법

전산해석에는 상용 3차원 전산유동해석 프로그램인 FLUENT 6.3 Parallel을 사용하였다. 유한체적 경계면에서의 변수들은 모두 2차의 정확도를 가지는 풍상차분법을 적용하였고, 내재적 (Implicit) 방법으로 계산하였다. 난류 처리를 위해서는 2방정식 모델인 SST k- $\omega$  모델을 사용하였다. 로터 블레이드 벽면 근처에서  $y^+ < 5$ 를 만족시키도록 격자 배치를 하였다.

계산에 사용된 경계조건은 터빈 입구에서 전압력 1.95 MPa, 전온도 373 K이고 터빈 출구에는 정압력 0.1 MPa를 주었으며 1단 로터는 6147.5 RPM으로 회전하도록 하였다. 모든 벽면에는 점착조건을 적용하였다. 노즐을 제외한 각 계산영역들은 회전주기조건을 주어 계산하게 되고 노즐 출구와 축 간극 입구의 인터페이스에서는 Non-conformal mesh기법을 사용하여 모델링하였다. 정지-회전 영역 인터페이스인 축 간극과 로터, 로터와 후류 사이는 정상상태 해석 모델인 프로즌로터(Frozen rotor) 기법을 각각 적용해서 경계 값을 주고받는다[9]. 프로즌 로터 기법은 동익의 위치를 고정하고 동익 부분의 지배방정식에 원심력과 코리올리 효과를 고려하여 계산을 하는 방식이다.

계산에 사용된 밀도는 이상기체 식을 이용하였고 그 외의 물성치들은 온도에 따라 변화도록 모델링하여 사용하였다. 수렴은 잔차(Residual)값이 1.0E-04까지 떨어지고 30,000번 정도의 반복 계산을 한 후 수렴했다고 판단하였다.

#### 2.4 계산 케이스

계산에 사용된 터빈의 각 지점 명칭을 Fig. 4에 나타내었다.

본 논문에서는 모두 3가지의 경우에 대해 계산이 이루어졌다. 앞서 서론에서 언급하였듯이 기존의 연구결과[8]에서 의미 있는 성능향상을 보인 후방 스위프 15°에 대하여 좀 더 자세한 유동 분석을 통해 성능향상의 원인을 살펴보기 위하여, -15°, 0°, 15°에 해당하는 세 가지 케이스를 다음과 같이 선택하여 비교분석 하였다.

기준이 되는 스위프 없는 모델(0°, No Sweep, 이하 NSW로 표기)을 포함하여 후방스weep(15°, Backward Sweep, 이하 BSW로 표기), 전방스weep(-15°, Forward Sweep, 이하 FSW로 표기) 모델에 대해 해석을 실시하였다.

축 간극은 로터 블레이드 높이로 무차원화 한

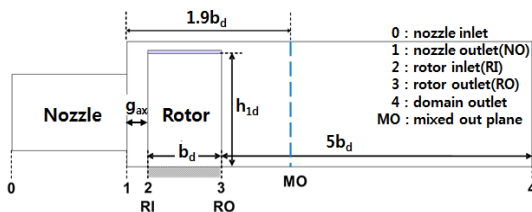


Fig. 4 Turbine geometry

값인  $g_{ax}/h_{1d}$ 을 0.207로 설정하고 계산을 수행하였고 블레이드 중간단면에서의 축간극  $g_{ax}/h_{1d} = 0.207$ 은 블레이드가 스위프 된 모델들의 허브(Hub)나 팁(Tip) 중 가장 짧은 축 간극 거리가 2.4 mm가 되도록 조절 한 것이다.

계산에 사용한 상용해석프로그램은 조종재 등 [10]이 앞서 수행한 연구에서 검증을 통해 초음속 터빈 성능예측에 신뢰성을 확보하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Table 2에는 계산을 통해 얻어진 각 케이스별 성능결과를 나타내었다. 표에 언급되는 NO, RI, RO면은 Fig. 4에 나와 있듯이 각각 노즐 출구, 로터 입구 그리고 로터 출구 면에서의 값을 의미하고 MO면은 로터 출구와 팁 출구에서 나온 유동이 어느 정도 혼합이 되는 혼합 출구 지점을 정의 한 것으로 본 논문에서는 스위프 모델과 상관없이 모두 노즐 출구에서 후류 쪽으로 날개 코드길이의 1.9배만큼 떨어져 있는 공통된 지점이다.

Figure 5는 노즐을 빠져나온 유동이 로터 슈라우드(Shroud)와 터빈 케이싱(Casing) 사이의 팁 간극(Tip clearance)을 통해 누설되는 것을 도식적으로 나타낸 그림이다.

로터의 팁 간극을 통해 빠져나가는 질량 유량을 전체 유량(노즐 입구 유량)으로 나눈 비를 각 계산 모델별로 막대그래프로 비교해 나타낸 팁 누설량 그림이 Fig. 6에 나와 있다.

Table 2. Computational results

Model	Tip Leakage (%)	Mach No. / Rel. Mach No.			Relative Flow Angle (°)		Total-to-static Efficiency (%)		
		NO	RI	RO	RI	RO	RO	MO	
$g_{ax}/h_{1d} = 0.207$	NSW	4.06	2.41	1.96	1.56	20.44	21.71	45.79	45.05
	FSW	5.39	2.36	1.90	1.58	18.98	22.72	45.50	44.44
	BSW	2.76	2.43	2.00	1.55	22.91	21.89	46.03	45.81

RO: Rotor Out Plane / MO: Mixed Out Plane

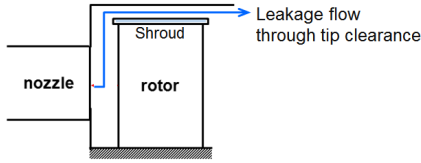


Fig. 5 Tip leakage flow through tip clearance

Table 2와 Fig. 6을 보면 팁 간극을 통해 빠져 나가는 누설량에 스윙이 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 스윙에 따른 팁 누설정도를 비교하면 기준이 되는 NSW 모델에 비해 FSW 모델은 팁 간극 누설량이 크게 늘어났고 BSW 모델은 누설량은 상당히 줄어들었음을 알 수 있다.

이런 누설흐름은 터빈에서 출력을 감소시키는 요인이 되고 누설된 흐름의 양은 터빈 효율에도 영향을 주게 된다.

Figure 7은 로터 출구면(RO)과 혼합 출구면(MO)에서의 터빈의 정효율을 각 스윙 모델 별로 표시한 그래프이다.

사용된 터빈의 정효율 식은 다음의 Eq. 1과 같다.

$$\eta_{ts} = \frac{1 - T_2/T_{01}}{1 - (P_2/P_{01})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \cdot 100 \quad (1)$$

Figure 7에 나타나 있는 바와 같이 로터 출구(RO)면에서의 정효율과 혼합 출구(MO)면에서의 정효율 모두 BSW모델이 제일 높은 값을 보이고 FSW모델이 가장 낮은 값을 보이고 있다.

로터 출구(RO)면에서 정효율은 세 모델 서로 간의 차이가 0.2% ~ 0.5% 내로 큰 차이를 보이지 않지만 혼합 출구(MO)면에서의 효율은 후류에 의한 손실과 마찰 손실 외에도 팁 간극으로 누설되어 나온 유량과 주유동의 혼합으로 인한 부가적인 손실이 더 생기기 때문에 팁누설량 그래프에서 살펴 본 누설 유량에 비례하여 효율이 떨어지는 경향을 보인다. 그 결과, 누설유량이 적었던 BSW모델의 효율이 기준이 되는 NSW 모델보다 0.8% 가량 더 높게 나오는 결과를 보이고 있다.

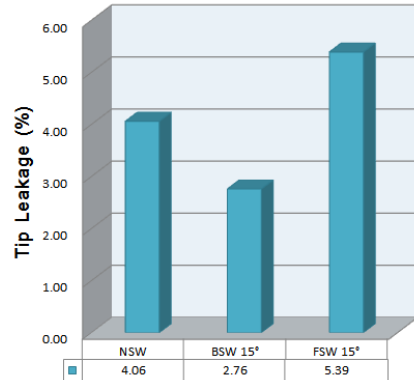


Fig. 6 Tip leakage (%)

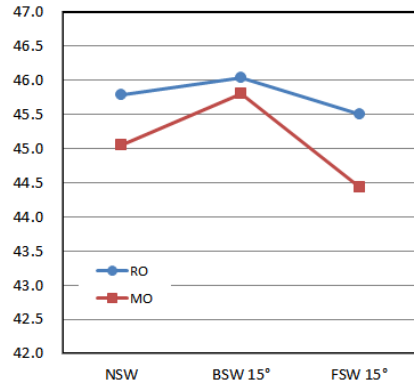


Fig. 7 Total-to-static efficiency (%)

Figure 8에는 터빈 여러 위치에서의 유량평균된 정압력을 설계배압( $P_b$ )으로 무차원화 한 그래프를 나타내었다. 그래프를 보면 노즐 출구(NO)에서는 각 모델간의 정압력이 상대적으로 크게 차이나는 것을 볼 수 있다. NSW모델에 비해 BSW모델은 노즐 내부에서 유동이 더 팽창해서 나오고 그 결과로 Table 2에서 확인되는 바와 같이 노즐 출구와 로터 입구에서의 마하수가 다른 모델과 견주어 제일 크다. 이에 반해 FSW모델의 경우는 기준모델과 비교해 노즐에서 팽창을 덜 하는 것으로 나타났다. 로터 유로 내에서의 압력도 BSW모델이 비교적 균등하게 나오는데 비해 NSW와 FSW모델은 유로 내에서 유동이 팽창을 해서 로터 입·출구의 압력변화가 꽤 있음을 알 수 있다.

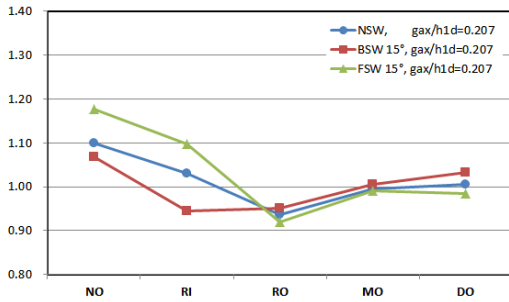


Fig. 8 Static Pressure at each section ( $p/p_b$ )

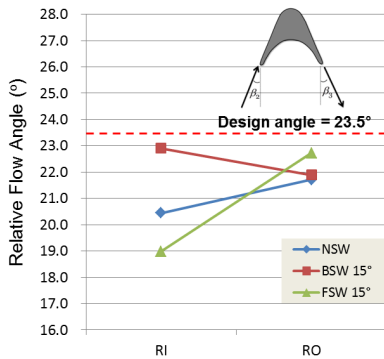
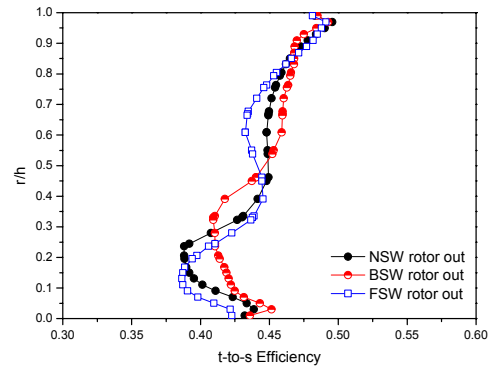


Fig. 9 Relative flow angle

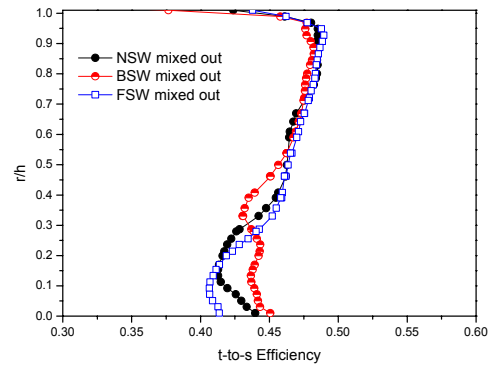
Figure 9에는 Table 2에 나와 있는 스윙을 적용한 모델들의 로터 상대 입구유동각( $\beta_2$ )과 상대 출구유동각( $\beta_3$ )을 서로 비교하여 그래프로 나타내었다. 설계 유동각도는 입·출구 모두 23.5°로, BSW모델이 NSW모델이나 FSW모델과 비교하여 입구 상대 유동각도가 설계값에 더 가까운 결과를 보인다. 출구 유동각은 NSW와 BSW모델은 큰 차이를 보이지 않고 FSW모델의 경우 약간 더 로터 회전방향으로 휘어져 나오는 것을 알 수 있다.

Figure 10의 (a)와 (b)는 각각 국부 스패น 높이에서의 정효율  $\eta_{ts}$ 를 피치방향으로 평균하여 로터 출구면(RO)과 혼합 출구면(MO)에서 블레이드 스패น 길이 방향으로 나타난 그림이다.

로터 출구 면에서의 손실(Loss)에는 형상 손실과 흡입면 박리, 충격파에 의한 손실 그리고 2차 유동 손실의 영향 등이 포함 되어 있다. 그리고 혼합 출구면(MO)에는 익렬 뒷전에서 생기는 충



(a) Rotor out (RO) plane



(b) Mixed out (MO) plane

Fig. 10 Local t-to-s efficiency  $\eta_{ts}$  along the spanwise direction

격파와 팽창파에 의한 손실이나 앞서도 언급했던 팁 간극으로 빠져나온 유동이 주 유동과 섞이면서 그에 의해 발생하는 부수적인 손실 등이 추가된다.

계산 결과에 따르면 스윙 모델마다 스패의 특정 부분에서 손실이 서로 다른 양상을 보이고 있다. Fig. 10(a)의 로터 출구면(RO) 결과에서는 대략 허브에서 스패의 30%, 그리고 55%에서 85% 사이에서 NSW모델에 비해 BSW모델이 효율이 좋게 나오고 블레이드 중간 단면 아래 쪽(30~50%)은 FSW모델의 효율 값이 국부적으로 높게 나타났다. Fig. 10(b)를 보면 혼합 출구면(MO)에서는 대략 허브 쪽 25% 내외까지는 BSW 모델의 성능이 좋은 것을 알 수 있고 그 위로부터 블레이드 중간 단면 영역에서는 NSW와

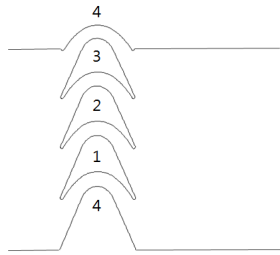


Fig. 11 Blade numbering

FSW모델이 BSW모델보다 좋은 성능을 나타내고 있다. 스윙 모델별로 차이를 많이 보이는 곳은 허브근처의 영역임을 확인 할 수 있다.

다음으로, 로터 블레이드의 정압 분포를 스패의 15%, 50%에 대해 살펴보았다. Fig. 11은 편의를 위해 노즐 하나의 유동영역에 해당하는 로터 4개의 번호를 임의로 붙여 놓은 그림이다. Fig. 12와 Fig. 13은 각각 로터 스패길이의 15%와 50%에 해당하는 블레이드의 정압분포를 나타낸 그림이다.

Figure 12에서 허브에 가까운 스패의 15%에서의 정압분포를 보게 되면 (a)Blade1에서는 BSW의 압력면 정압이 약간 작은 점을 제외하면 (b)Blade2와 (c)Blade3에서는 BSW모델의 압력면의 정압이 나머지 모델에 비해 상당히 증가한 점이 눈에 띈다. 반면 FSW모델은 허브 부근의 (b)Blade2~(d)Blade 4에서 압력면 정압이 줄어든 것을 알 수 있다. 이런 현상은 국부적인 효율을 살펴봤던 Fig. 10(a)에서의 허브 근처 스패영역 그래프와 일치하는 결과를 보여주고 있다.

Figure 13에서는 블레이드 중간 단면에서의 블레이드 정압분포를 나타내고 있는데 Fig. 13 (a)Blade 1, (b)Blade 2 및 (c)Blade 3의 흡입면에서 블레이드 앞전에 생긴 궁형 충격파가 유로내로 들어오면서 흡입면에 접착되는 통로 충격파(Passage shock)의 위치가 보인다. 또한 BSW모델의 경우가 통로 충격파(Passage shock) 통과 이후의 정압 상승이 가장 적게 일어나는 것을 관찰 할 수 있다. 이것은 Table 1에서 보았듯이 노즐 출구를 나온 유동의 마하수는 BSW모델이 제일 크지만 앞서 살펴 본 바와 같이 유동의 상대 입사각이 설계 유동각도와 가장 유사하고 또

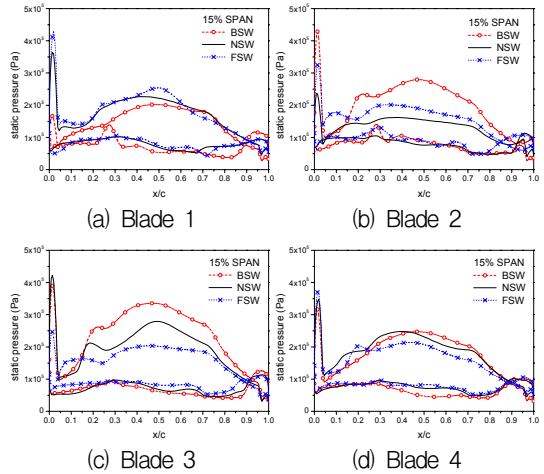


Fig. 12 Static pressure distributions at 15% span on the blade surfaces

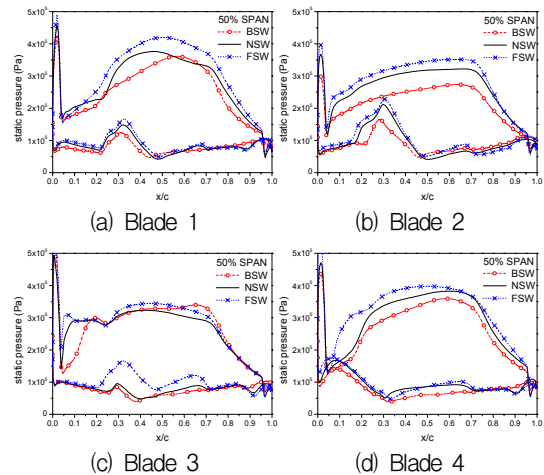


Fig. 13 Static pressure distributions at 50% span on the blade surfaces

한 NSW모델과 달리 유동을 수직으로 만나지 않으므로써 충격파의 강도가 다소 약해질 수 있음을 나타낸다.

그러나 압력면에서의 정압력은 (c)Blade3을 제외하면 전반적으로 BSW모델이 NSW와 FSW모델보다 줄어 든 양상을 보인다. 이 결과 역시 국부적인 효율 그래프 Fig 10(a)의 중간 단면 부근에서의 효율과 어느 정도 일치되는 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

부분 흡입형 초음속 터빈의 1단 로터 블레이드에 15°의 스위프 각도를 적용하여 전방스weep(FSW)과 후방스weep(BSW) 모델의 유동형태 및 성능을 스위프가 없는 기준 모델(NSW)과 비교하여 스위프 효과가 유동과 터빈 성능에 미치는 영향을 살펴 보았다.

팁 간극으로 빠져나가는 누설 유량은 FSW, NSW, BSW 모델 사이에 큰 차이를 보였으며 그 중에서 BSW 모델의 경우 기준 모델에 비해 팁 간극 누설 손실량을 줄이는데 효과가 있었다. 또한, BSW 모델은 NSW 모델과 비교하여 0.8% 가량의 정효율 증가를 가져왔다.

반면 FSW 모델은 BSW 모델에 비해 팁 누설 손실량이나 효율 면에서는 크게 개선되는 현상이 보이지 않았다. 그러나 부분적인 유동을 살펴 보면 터빈유로 내의 허브와 중간 단면 아래 영역 쪽에서 FSW 모델과 BSW 모델이 NSW 모델에 비해 2차 유동을 줄여주어 좋은 성능을 보이는 구간이 존재하였다. 특히 BSW 모델은 허브에서 스펠의 30%까지의 영역에서 상대적으로 높은 효율을 보였다.

#### 후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

#### 참 고 문 헌

- Hah, C., Puterbaugh, S. L., and Wadia, A. R., 1999, "Control of shock structure and secondary flow field inside transonic compressor rotor through adrodynamic sweep," ASME 99-GT-561, 1999
- Vad, J., Kwedikha, A.R.A., and Jaberg, H., "Influence of Blade Sweep on the Energetic Behavior of Axial Flow Turbomachinery Rotors at Design Flow Rate," ASME Turbo Expo, GT-2004-53544, 2004
- Denton, J. D. and Xu, L., "The effect of lean and sweep on transonic fan performance," ASME Turbo Expo, GT-2002-30327, 2002
- Pullan, G. and Harvey, N. D., "Influence of Sweep on Axial Flow Turbine Aerodynamics at Midspan," Journal of Turbomachinery, Vol. 129, No. 3, 2007, pp.591-598
- Pullan, G. and Harvey, N. D., "Influence of Sweep on Axial Flow Turbine Aerodynamics in the Endwall Region," Journal of Turbomachinery, Vol. 130, No. 4, 2008, pp.041011-1~041011-10
- 서성진, 최승만, 김광용, "형상 최적화를 통한 축류송풍기의 설계," 대한기계학회논문집 B, 제30권, 제7호, 2006, pp.603-611
- 안찬술, 김광용, "반응면 기법을 이용한 축류 압축기의 3차원 형상 최적설계," 유체기계 연구개발 발표회 논문집, 2001, pp.135-142
- 권태운, 정수인, 조종재, 김귀순, 정은환, "스weep과 린을 적용한 부분흡입형 초음속 터빈의 성능 특성에 관한 수치적 연구," 한국추진공학회지, 제15권, 제2호, 2011, pp.36-43
- 노준구, 정은환, 이은석, 김진한, "프로즌 로터 기법을 이용한 부분흡입형 터빈 수치해석," 유체기계저널 제7권, 제6호, 2004, pp.15-20
- 조종재, 김귀순, "속도 복합형 초음속 충동형 터빈의 동익 오버랩에 따른 성능 특성," 한국추진공학회지 제15권, 제1호, 2011, pp.19-28